

基于小波分析的信号电缆在线故障定位技术与系统实现

陈思学

北京航空航天大学, 北京, 100191;

摘要: 随着现代通信和电力系统的快速发展, 信号电缆作为信息和能量传输的关键部件, 其运行的可靠性至关重要。一旦电缆出现故障, 会严重影响系统的正常运行。本研究聚焦于基于小波分析的信号电缆在线故障定位技术及系统实现。通过对小波分析理论的深入研究, 利用其在时频域分析方面的独特优势, 能够准确捕捉电缆故障产生的瞬态信号特征。在详细分析电缆故障信号特性的基础上, 设计了故障定位算法, 并构建了在线故障定位系统。该系统集成了信号采集、处理、分析和定位等功能模块, 能够实时、准确地对电缆故障进行定位。经过实际测试验证, 该技术和系统具有较高的定位精度和可靠性, 可有效提高信号电缆的维护效率, 降低维护成本, 对于保障信号电缆的安全稳定运行具有重要意义。

关键词: 小波分析; 信号电缆; 在线故障定位; 故障特征提取; 系统实现

DOI: 10.64216/3080-1508.25.09.018

信号电缆在通信、电力等领域至关重要, 但长期运行易受损伤和老化影响, 导致故障频发, 可能引发安全事故与经济损失。快速准确定位故障对保障系统稳定运行意义重大。传统定位方法存在需停电或精度不足等问题, 难以满足在线检测需求。小波分析具有优良的时频局部化能力, 可有效提取故障特征信息, 为电缆故障定位提供了新途径。

1 小波分析理论基础

1.1 小波分析的基本概念

小波分析是一种时频分析方法, 它通过对信号进行多尺度分解, 将信号在不同尺度和不同位置上进行分析。与传统的傅里叶变换相比, 小波分析能够同时提供信号的时域和频域信息, 具有更好的时频局部化特性。小波函数是小波分析的核心, 它是一个具有紧支集的函数, 通过对小波函数进行平移和伸缩, 可以得到一系列的小波基函数。

小波变换是将信号与小波基函数进行内积运算, 得到信号在不同尺度和位置上的小波系数。小波系数反映了信号在不同尺度和位置上的特征信息, 通过对小波系数的分析, 可以提取信号的各种特征。小波分析的多分辨率分析特性使得它能够在不同的尺度上对信号进行分析, 从而更好地捕捉信号的细节信息。

1.2 小波变换的类型

小波变换主要分为连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)。连续小波变换是对信号进行连续的尺度和位置变换, 它可以提供信号的完整时频信息, 但计算量较大。离散小波变换是对连续小波变换的离散化, 它通过对尺度和位置进行离散采样, 减少了计算量, 提

高了计算效率^[1]。

在实际应用中, 离散小波变换更为常用。离散小波变换可以通过快速算法实现, 如Mallat算法。Mallat算法是一种高效的离散小波变换算法, 它将信号分解为近似信号和细节信号, 通过不断地对近似信号进行分解, 可以得到信号在不同尺度上的分解结果。

1.3 小波分析在信号处理中的优势

小波分析在信号处理中具有许多优势。它能够有效地处理非平稳信号。由于小波分析具有良好的时频局部化特性, 能够在不同的时间和频率尺度上对信号进行分析, 因此对于非平稳信号的处理效果优于传统的傅里叶变换。小波分析可以进行信号的降噪处理。通过对信号进行小波分解, 将信号中的噪声成分分离出来, 然后对小波系数进行阈值处理, 去除噪声成分, 最后通过小波重构得到降噪后的信号。小波分析还可以用于信号的特征提取和故障诊断等领域。

2 信号电缆故障特性分析

2.1 信号电缆常见故障类型

信号电缆常见的故障类型包括短路故障、断路故障、绝缘故障等。短路故障是指电缆的导体之间或导体与屏蔽层之间发生短路, 导致电流异常增大。断路故障是指电缆的导体发生断裂, 导致信号传输中断。绝缘故障是指电缆的绝缘层受到损坏, 导致绝缘电阻下降, 可能会引发漏电、短路等问题。

不同类型的故障具有不同的特征。短路故障会产生较大的短路电流, 故障点会产生明显的发热现象。断路故障会导致信号传输中断, 在故障点处会出现信号突变。绝缘故障会导致电缆的绝缘性能下降, 可能会出现泄漏

电流增大、局部放电等现象^[2]。

2.2 故障信号的特征分析

电缆故障发生时,会产生各种故障信号,如电流信号、电压信号等。这些故障信号具有一定的特征,可以通过对这些特征的分析来定位故障位置。故障信号通常包含高频成分,这些高频成分是由于故障瞬间产生的瞬态过程引起的。小波分析可以有效地提取这些高频成分,从而准确地捕捉故障信号的特征。

故障信号的特征还与故障类型、故障位置等因素有关。例如,短路故障产生的故障信号的高频成分相对较强,而断路故障产生的故障信号的高频成分相对较弱。通过对故障信号的特征进行分析,可以判断故障的类型和大致位置。

2.3 影响故障定位的因素

在信号电缆故障定位过程中,多种因素制约着定位精度的提升。电缆长度过长会导致故障信号在传输中发生显著衰减,降低信噪比,可通过采用高灵敏度检测设备或结合分段测试法以减小误差。电缆结构差异影响波阻抗与信号传播速度,需依据具体型号建立精确的传输线模型,并校正波速参数以提高测量准确性。故障点接地电阻的变化会改变反射系数,导致行波反射强度减弱或畸变,可借助双端测距法或多频信号注入技术增强信号辨识能力。此外,外部电磁干扰与环境噪声易引起信号失真,建议采用屏蔽措施、差分信号处理或小波去噪算法抑制干扰成分。通过优化测试方法、建模精度及信号处理手段,可有效提升故障定位的可靠性与准确度。

3 基于小波分析的故障定位算法设计

3.1 故障信号的小波分解与重构

在基于小波分析的故障定位算法中,首先需要对手故障信号进行小波分解。通过选择合适的小波基函数和分解层数,将故障信号分解为不同尺度上的近似信号和细节信号。近似信号反映了信号的低频成分,细节信号反映了信号的高频成分^[3]。

在小波分解后,需要对分解后的信号进行分析,提取故障特征。通常,故障信号的高频成分包含了故障的关键信息,因此可以重点分析细节信号。在提取故障特征后,需要对信号进行小波重构,得到包含故障特征的信号。小波重构是小波分解的逆过程,通过对分解后的信号进行重构,可以恢复原始信号的部分信息。

3.2 故障特征提取方法

故障特征提取是故障定位的关键步骤。常用的故障特征提取方法包括小波系数模极大值法、小波能量法等。

小波系数模极大值法是通过寻找小波系数的模极大值点来确定故障信号的突变点,从而提取故障特征。小波能量法是通过计算小波系数的能量来反映故障信号的能量分布,从而提取故障特征。

在实际应用中,可以根据具体情况选择合适的故障特征提取方法。对于一些故障信号突变明显的情况,可以采用小波系数模极大值法;对于一些故障信号能量分布有明显变化的情况,可以采用小波能量法。

3.3 故障定位算法流程

基于小波分析的故障定位算法流程主要包括信号采集、小波分解、故障特征提取、故障定位计算等步骤。通过传感器采集电缆的故障信号。对采集到的故障信号进行小波分解,得到不同尺度上的近似信号和细节信号。接着,采用合适的故障特征提取方法提取故障特征。根据故障特征和电缆的参数,计算故障位置。

在故障定位计算过程中,可以采用行波法、阻抗法等方法。行波法是根据故障产生的行波在电缆中的传播速度和时间来计算故障位置;阻抗法是根据电缆的阻抗特性和故障信号的测量值来计算故障位置。

4 在线故障定位系统的硬件设计

4.1 系统总体架构设计

在线故障定位系统的总体架构主要包括信号采集模块、信号处理模块、数据存储模块、显示模块等。信号采集模块负责采集电缆的故障信号,将模拟信号转换为数字信号。信号处理模块负责对采集到的信号进行处理,包括小波分解、故障特征提取、故障定位计算等。数据存储模块负责存储采集到的信号和处理结果。显示模块负责显示故障定位结果和相关信息^[4]。

系统采用模块化设计,各个模块之间通过接口进行通信。这样可以提高系统的可扩展性和维护性。系统还可以通过网络接口与远程监控中心进行通信,实现远程监控和管理。

4.2 信号采集模块设计

信号采集模块作为在线故障定位系统的关键环节,其性能直接决定系统的检测精度与响应实时性。该模块由传感器、放大电路、滤波电路及模数转换器(A/D)等核心组件构成。传感器实现电缆运行状态中电流、电压等物理量向电信号的转换,其测量精度与灵敏度显著影响原始信号的保真度。前置放大器对微弱传感信号进行增益调理,确保信噪比满足后续处理需求;滤波电路抑制高频干扰与工频谐波,提升信号纯净度。A/D转换器将模拟信号离散化为数字序列,其分辨率(通常不低于16位)与采样率(≥ 1 MHz)共同决定了系统的量化

精度与时域分辨率,进而影响故障特征提取的准确性与定位实时性。模块整体设计需兼顾高精度传感与高速高分辨率数据采集,以实现亚米级定位精度与毫秒级响应性能。

4.3 信号处理模块设计

信号处理模块作为在线故障定位系统的核心单元,承担着对原始采集信号的预处理、特征提取与故障判别等关键任务。该模块主要由高性能微处理器、高速存储器及集成化算法库构成。微处理器执行包括小波变换分解、故障特征增强与定位计算在内的核心算法,其运算能力直接决定系统的实时性与处理精度,通常可实现毫秒级响应与亚米级定位性能。存储器用于固化程序代码及缓存动态数据,保障系统稳定运行。算法库存储经验证的信号处理与故障识别模型,其完备性与鲁棒性显著影响定位结果的准确性与系统可靠性。模块设计需综合考量处理器主频、浮点运算能力与算法复杂度匹配度,以确保在复杂工况下达到高精度($\leq 1\%$ 误差)与高稳定性指标。

5 在线故障定位系统的软件实现

5.1 软件总体架构设计

在线故障定位系统的软件总体架构主要包括操作系统、驱动程序、应用程序等。操作系统负责管理系统的硬件资源和软件资源,提供多任务处理和内存管理等功能。驱动程序负责控制硬件设备的运行,如传感器、A/D转换器等。应用程序负责实现信号处理、故障定位等功能。

软件采用分层设计,各个层次之间通过接口进行通信。这样可以提高软件的可维护性和可扩展性。软件还可以采用模块化设计,将不同的功能模块封装成独立的模块,便于开发和维护。

5.2 信号处理软件模块实现

信号处理软件模块是在线故障定位系统的关键模块,它负责对采集到的信号进行处理和分析。信号处理软件模块主要包括小波分解模块、故障特征提取模块、故障定位计算模块等。小波分解模块负责对采集到的信号进行小波分解,得到不同尺度上的近似信号和细节信号。故障特征提取模块负责采用合适的方法提取故障特征。故障定位计算模块负责根据故障特征和电缆的参数,计算故障位置。

在信号处理软件模块实现中,需要采用高效的算法和数据结构。还需要考虑软件的实时性和可靠性,确保

系统能够及时、准确地处理故障信号^[5]。

5.3 人机交互界面设计

人机交互界面是在线故障定位系统与用户进行交互的重要接口。人机交互界面主要包括故障定位结果显示、参数设置、历史数据查询等功能。故障定位结果显示功能可以直观地显示故障位置和相关信息。参数设置功能可以让用户根据实际情况设置系统的参数,如小波基函数、分解层数等。历史数据查询功能可以让用户查询历史故障记录和处理结果。

在人机交互界面设计中,需要注重界面的友好性和易用性。采用直观的图形界面和简洁的操作方式,方便用户使用。还需要考虑界面的响应速度和稳定性,确保用户能够及时、准确地获取系统信息。

5 结语

本研究针对信号电缆在线故障定位,提出基于小波分析的技术与系统实现。利用小波在时频域的优势,准确捕捉故障瞬态特征,设计高效故障定位算法,提升定位精度。系统硬件采用模块化设计,信号采集与处理模块协同工作,确保数据准确性与处理效率。软件层面实施分层模块化架构,提升可维护性与扩展性,配有人性化人机界面。实测结果表明,系统定位精度高、运行可靠,显著提升维护效率,降低运维成本。未来可进一步优化算法,增强抗干扰能力,并融合智能电网、物联网技术,推动电缆系统的智能化管理与安全稳定运行。

参考文献

- [1]王向东.基于小波分析的电力电缆行波在线故障定位技术[D].四川省:西南交通大学,2014.
- [2]丁希鹏.基于CEEMDAN与小波分析的电缆故障定位技术研究[D].安徽省:安徽理工大学,2022.
- [3]董光波,张锡恩,刘鹏远,等.基于多传感器和小波分析技术的某型装备在线故障诊断系统的研究与实现[J].计算机工程与应用,2002,38(15):46-48.
- [4]王晓卫,王雪,王璐,等.基于矩阵变换与模态分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J].电工技术学报,2025,40(15):4845-4859.
- [5]许鹏,李剑,虞跃,等.基于北斗系统的中低压电网接地故障定位技术研究与实现[J].计算机应用与软件,2025,42(02):125-128.

作者简介:陈思学(2001年8月—)男,民族:汉,籍贯:海南省海口市,学历:本科,职称:无,研究方向:数字信号处理和电缆故障监测。